第 58 卷 第 7 期
2015 年 7 月

地 球 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS

Vol. 58, No. 7
Jul., 2015

邱娜,陈艳红,王文斌等. 2015. 中低纬地区电离层对 CIR 和 CME 响应的统计分析. 地球物理学报,58(7):2250-2262,doi:10.6038/cjg20150704.

Qiu N, Chen Y H, Wang W B, et al. 2015. Statistical analysis of the ionosphere response to the CIR and CME in Mid-latitude regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),58(7):2250-2262,doi:10.6038/cjg20150704.

中低纬地区电离层对 CIR 和 CME 响应的统计分析

邱娜[1,2],陈艳红[1],王文斌[3],龚建村[1],刘四清[1]

1 中国科学院空间科学应用与研究中心,北京 100190
2 中国科学院大学,北京 100049
3 美国大气研究中心,博尔德 80307

摘要 本文利用中低纬日本地区(131°E, 35°N)GPS-TEC 格点化数据,分析了 2001—2009 年间 109 个共转相互作用区(CIR)事件、45 个日冕物质抛射 (CME)事件引起的地磁扰动期间电离层的响应. 结果表明,电离层暴的类型随太阳活动的变化而有不同的变化,CIR 事件引发的电离层正相暴、正负双相暴多发生在太阳活动下降年,负相暴多发生在高年,负正双相暴多发生在低年;CME 事件引发的电离层正相暴和负相暴多发生在高年. CIR 和 CME 引发的不同类型的电离层暴的季节性差异不大,在夏季多发生正负双相暴. 电离层暴发生时间相对地磁暴的时延大部分在−6~6 h 之间,但 CIR 引发的电离层暴时延范围更广,在−12~24 h 之间,而 CME 引发的电离层暴时延主要在−6~6 h 之间. 中低纬的电离层暴多发生在主相阶段,其中 CIR 引发的双相暴也会发生在初相阶段. 电离层负暴多发生在 AE 最大值为 800~1200 nT 之间. CIR 引起的电离层扰动持续时间较长,一般在 1~6 天左右,而 CME 引起的电离层扰动持续时间一般在 1~4 天左右.

关键词 电离层暴;CIR;CME;磁暴;持续时间

doi:10.6038/cjg20150704 **中图分类号** P352 **收稿日期** 2014-12-05,2015-06-09 收修定稿

Statistical analysis of the ionosphere response to the CIR and CME in Mid-latitude regions

QIU Na[1,2], CHEN Yan-Hong[1], WANG Wen-Bin[3], GONG Jian-Cun[1], LIU Si-Qing[1]

1 *Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3 *High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, Boulder* 80307, *USA*

Abstract The study of the ionosphere responses to Corotating Interaction Regions (CIRs) and Coronal Mass Ejections (CMEs) got much attentions in rencent years. With the comparison of different types of ionosphere response caused by different disturbance sources from solar activity and interplanetary solar wind, morphological changes and physical process of ionospheric storms can be understood more impressively and comprehensively. It provides a possibility to predict ionospheric disturbance states according to different solar wind conditions in advance as well.

GPS-TEC data at a mid-latitude station (131°E, 35°N) are used to analyze the ionosphere response during geomagnetic disturbances induced by 109 CIRs and 45 CMEs over the period 2001 to 2009. Firstly, the TEC difference are determined to achieve the information of ionospheric positive or negative storms during the CIR and CME events. The definition of a ionospheric

基金项目 国家重点基础研究发展计划(2012CB825606,2011CB811406)资助.

作者简介 邱娜,女,硕士研究生,研究方向为电离层物理. E-mail:qiuna458317070@126.com

storms is relative TEC greater than or equal to 15% and persisting for more than 4 hours; Secondly, year dependence, seasonal dependence, time delay between ionospheric storms and geomagnetic storms, geomantic storm intensity dependence and time duration of ionospheric storms are analyzed in detail.

Analysis results indicate that the types of ionospheric storms vary in different phases of a solar cycle. CIR-driven positive and positive-negative storms are more likely to occur in the declining phase of the solar cycle, while negative phase storms more in solar maximum and negative-positive storms mainly in solar minimum. CME-driven positive storms and negative storms mostly occur in solar maximum. There is no remarkable seasonal difference for the occurrence of different types of ionospheric storms except the positive-negative storms most likely to occur in summer. The time delays between geomagnetic disturbances and the start time of ionospheric storms are −6 to 6 hours in general, but CIR-driven ionopsheric storms involve in a wider range with a time delay of −12 to 24 hours and CME-driven storms is delayed from −6 to 6 hours. Moreover, for CIR-driven ionospheric storms, positive and negative storms mostly occur in main phase of magnetic storms, positive-negative storms mostly in initial and main phase, and negative-positive storms mainly in initial phase. For CME-driven storms, positive, negative and positive-negative storms basically occur in main phase. Our investigation also demonstrates certain correlation between the types of ionospheric storms and the AE maximum indices. Ionopsheric negative storms often occur in stronger geomagnetic activity, with the AE maximum intensity between 800 to 1200nT while positive-negative storms tend to occur with AE maximum intensity higher than 400 nT. Compared to CIR driven storms, AE maximum value during CME driven storms is higher. The duration of CIR-driven storms is longer (1 to 6 days) than that of CME-driven storms (1 to 4 days).

The ionosphere response to interplanetary conditions contribute to the study the ionospheric disturbance. Statistical analysis of the ionosphere response to the CIR and CME in Mid-latitude regions indicate that there are some certain correlations among ionospheric changes, solar activities, interplanetary conditions and geomagnetic conditions. The ionospheric storms could be predicted more accurately and meticulously by distinguishing the different types of interplanetary conditions.

Keywords Ionospheric storm; CIR; CME; Geomagnetic storm; Time duration

1 引言

太阳活动引起地磁扰动，同时伴随着全球范围内的电离层的变化，即电离层暴. 电离层暴发生时电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)可能增加(正相电离层暴也称正相暴)，也可能下降(负相电离层暴也称负相暴)，也可能既有增加又有下降(双相电离层暴. 其中电子密度先增加后下降的扰动我们叫做正负双相电离层暴也称正负双相暴，先下降后增加我们叫做负正双相电离层暴也称负正双相暴). 电离层暴的研究一直是电离层领域研究的热点之一.

目前关于电离层暴的统计分析已有大量的工作，以前的结果给出了电离层的一些气候学形态特征(Appleton et al., 1952; Martyn, 1953; Matsushita, 1959; Thomas and Venables, 1966; Mendillo, 1973; Balan and Rao, 1990)，比如白天的正暴效应，夜间的负暴效应，冬季更容易出现正暴，夏季更容易出现负暴等. 但是，这些只是一个非常平均的结果，实际上每一个地磁扰动在某一个时间、某一个地点对应的电离层扰动将如何表现，仍然很难回答. 正因为如此，对于特定经纬度的电离层扰动的统计研究，也受到了许多学者的关注(李春斌, 2012; 张奇伟等, 1995; 占亮等, 2007; 李利斌等, 1996; Prölss et al., 1991; Adeniyi, 1986; 赵必强, 2006; 徐继生等, 2006; Zhao et al., 2012; Zhao et al., 2013).

电离层暴是伴随着地磁暴发生的,而地磁暴的驱动源来自于太阳风扰动.引起地磁暴的源主要有两种类型:一种是由太阳冕洞发出的高速流在行星际传播过程中形成的共转相互作用区(Corotating Interaction Region, CIR)引起的地球磁场扰动(Crooker and Cliver,1994; Tsurutani et al.,1995),这类磁暴为重现型磁暴.另一类是由于太阳爆发的日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)到达地球空间引起的地磁扰动效应,这类磁暴为突发型磁暴.

近年来,关于CIR和CME引起的地磁暴的分析有一些报道.CME主要来源是太阳活动区的爆发,其发生的频次和太阳活动强弱关系密切,在太阳活动极大年发生频繁(Webb,1991; Yashiro et al.,2004).CIR具有约27天的重现性,主导了太阳活动下降年及低年的地磁扰动(Richardson et al.,2001; Mursula and Zieger,1996).CIR与CME引发的地磁暴基本形态一样存在着初相、主相、恢复相,但每个阶段的物理机制和引发的地磁暴形态特征存在着一定的差异(Tsurutani et al.,2006).Jian等介绍了CIR和CME在引发地磁暴过程中的不同作用(Jian L et al.,2006a; Jian L et al.,2006b).Borovsky和Denton(2010)利用多个卫星和多台仪器的观测数据对CIR、CME引起的地磁扰动做了对比分析得出:CME引起磁扰期间等离子体片密度高、磁暴强度强,CIR引起磁扰期间的磁扰持续时间长.一些对CIR、CME进行分析的文章也指出由于CIR和CME引起的地磁暴具有不同的表现,如磁暴强度、恢复相的持续时间、电离层产生的响应等(Burns et al.,2012).

但是关于电离层对CIR和CME响应的具体比较研究极少,目前只有刘晶等给出了CME和CIR期间电离层存在的共性和差异(Liu et al.,2010).两者相同点是引发的电离层暴具有季节和地方时差异特征,两者区别是夏季CME引发的电离层暴为负相暴,CIR引发的为正负双相暴,且CME期间电离层TEC变化的强度高于CIR期间的.在本文中,我们选择了中低纬地区日本格点(131°E, 35°N)(地磁纬度为28.24°N)2001—2009年间的TEC数据来具体统计分析电离层在磁暴期间的扰动特征,着重对CIR事件和CME事件引起的地磁扰动期间的响应特征进行比较分析,得到在不同扰动源下的电离层暴类型的太阳活动高低年分布、季节分布、时延、持续时间等特性.CIR的出现具有重现性,引起的地磁扰动具有可预测性,CME具有突发性,引起的地磁扰动强.通过对这两种不同类型扰动源引起的电离层响应的对比,让我们能更加深入地了解电离层暴的形态变化和物理过程,为将来根据不同太阳风条件,提前预测电离层的扰动状态提供参考.

2 数据及分析方法

2.1 地磁数据

本文根据Jian等制定的CIR、CME开始时间和结束时间的标准来选定不同源的事件引发的磁暴,并逐一确定该磁暴的主相开始时间和磁暴类型(Jian L et al.,2006a; Jian L et al.,2006b).

目前常用磁暴急始时间和主相开始时间表示磁暴开始时间.磁暴急始是行星际激波伴随的高速等离子体突然压缩磁层而引起的脉冲型扰动,一般在几个小时之内(Ogilvie et al.,1968; Siscoe et al.,1968).磁暴主相是由于赤道平面内建立了一个新的由较低能量的带电粒子组成的环电流引起的地磁扰动,主相开始时间对应着Dst指数开始持续的大幅度下降时刻(Akasofu and Chapman,1961).本文我们选择磁暴主相开始时间作为磁暴开始时间,是因为地磁急始与显著的磁层能量注入并没有太大的关系而磁暴主相与极区的能量注入有关.在实际情况下地磁场一直处于复杂的扰动中,且磁暴初相持续时间在2～10 h不等,磁暴急始很难准确确定,极易带来不可避免的人为误差.

在本文中我们用Jian等确定的CIR和CME列表来进行研究,每一个CIR和CME事件都给出了开始时间、结束时间(Jian L et al.,2006a; Jian L et al.,2006b).但是,我们没有直接将CIR、CME开始时间作为磁暴开始时间,因为磁暴的发生与CIR和CME之间存在一定的时间延迟.我们对磁暴主相开始时间与CIR、CME开始时间的时延做了统计.统计结果如图1所示.

CIR、CME是位于日地空间拉格朗日L1点处的ACE卫星和Wind卫星提供的数据,距离磁层还存在一定的距离.太阳风从L1处到磁层有一定的时延.根据图1的数据统计可以看到磁暴主相开始时间与CIR、CME开始时间的时延大于5h的比例为45.86%,CIR、CME开始时间并不能代替磁暴主相的开始时间.所以,最终我们选择将磁暴主相开始时间作为地磁活动时间.

2.2 电离层数据

电离层扰动在各个地区并不相同,在统计分析

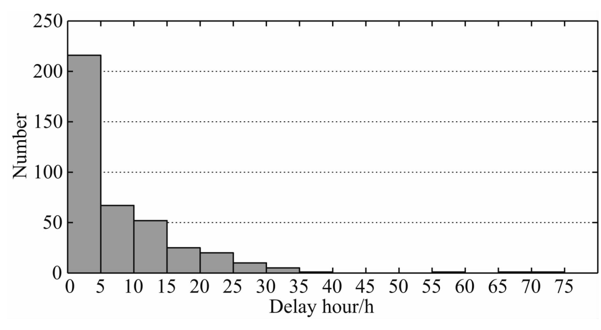


图 1　地磁暴的开始时间和 CIR、CME 开始时间的延迟
Fig. 1　Time delay between the onset of magnetic storms and that of CIRs and CMEs

前，首先要明确定义电离层扰动. 这里我们确定的方法是计算 TEC 偏离静日扰动的相对偏移量 ΔTEC，如下式：

$$\Delta\mathrm{TEC}=\frac{\mathrm{TEC}-\mathrm{TEC}_{静}}{\mathrm{TEC}_{静}}\times 100\%,$$

这里 TEC 代表每日某个时间点的 TEC 值，$\mathrm{TEC}_{静}$代表该时间点电离层的背景值，我们将其取为前后 7 天共 15 天的滑动中值. 当 |ΔTEC|≥15%，且持续 4 个小时以上时我们定义为某一次电离层扰动.

由于电离层静日变化明显，且目前对电离层静日变化的标准没有统一的看法，采用不同的标准分析电离层静日扰动存在着一定的差别(Wrenn et al.，1987；Belehaki et al.，2000). 有以磁暴发生前最近静日 1 天或者 5 天的 TEC 均值为基准，也有以当月的月中值或月均值或 28 日(扰日前 14 个静日，扰日后 14 个静日)的平均值作为基准. 这些方法各有优缺点. 我们采用前后 7 天共 15 天的滑动中值作为磁静日扰动量. 这样尽量地避免了前后不同源引发的电离层扰动带来的影响.

Kouris 等基于对西欧地区电离层变化特征的分析，提出了电离层 ΔTEC 连续 3 小时超过 0.2 作为电离层扰动的标准(Kouris et al.，2006；Kouris，2008). 邓忠新对青岛等 6 个台站数据分析选择 ΔTEC＞0.35(＜－0.3)，且连续 6 h 以上作为正(负)相电离层扰动(邓忠新等，2012). 我们利用中低纬地区日本格点(131°E，35°N)TEC 数据分析了该地区在 CIR 和 CME 事件期间电离层 TEC 相对静日扰动的分布，如图 2 所示. 这里 TEC 采用的是日本通信情报研究所发布的日本地区的 TEC 格点数据，该数据是利用日本地区约 200 多个 GPS 站的观测资料，将日本地区分为 2°×2°的 32 个格点得到的(Ma and Maruyama，2003). 图中可以看到 |ΔTEC|≥15%的占 50%左右，我们将电离层扰动的阈值设定为 |ΔTEC|≥15%，且持续时间在 4 h 以上.

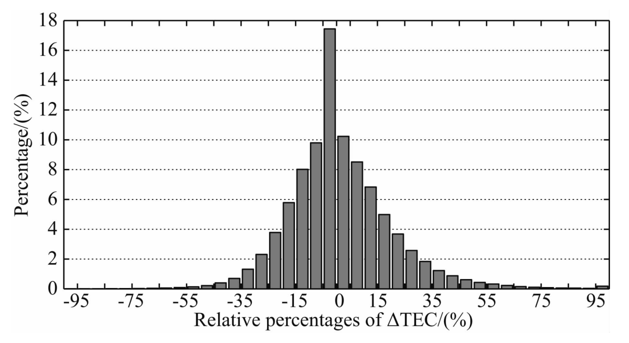


图 2　电离层 TEC 静日扰动相对偏移量百分比的频率分布图
Fig. 2　Histogram of the relative percentages of ΔTEC

为了清楚地显示地磁暴、电离层暴的选择标准，图 3—6 给出了正相暴、负相暴、正负双相暴、负正双相暴 4 个实例. 纵轴从上到下依次是：行星际磁场南北向分量 B_z、太阳风速度 V、太阳风密度 N、地磁指数 Dst、极光电急流 AE 指数、TEC 值、ΔTEC，横轴为世界时. 在这些事件中，红色实线为 CIR、CME 列表中给出的发生时间，红色虚线为 CIR、CME 结束时间，蓝色实线为我们确定的磁暴主相开始时间，绿色实线为电离层暴开始时间，绿色虚线为电离层暴结束时间，绿色点虚线为双相电离层暴的正负转换时间. 例如：图 3 为 CIR 事件期间的一次正相暴事件. 在这次事件中，CIR 发生在 2003 年 12 月 20 日 0 时(红色实线)，结束于 2003 年 12 月 22 日 0 时(红色虚线)，磁暴主相开始于 2003 年 12 月 20 日 7 时(蓝色实线)，而正相暴在 2003 年 12 月 20 日 7 时(绿色实线)开始，在 2003 年 12 月 22 日 10.5 时(绿色虚线)结束.

3　结果与讨论

按照第 2 节介绍的磁暴开始时间和电离层暴分类确定方法，我们利用中低纬地区日本格点(131°E，35°N)的 TEC 数据，选取 2001—2009 年磁暴发生在白天(8∶00LT—18∶00LT)的事例对不同行星际条件引发的地磁暴期间的电离层扰动形态进行统计分析，得到该地区电离层对 CIR 和 CME 响应的基本特征. 在本文中我们用“P”表示正相暴，“N”表示负相暴，“P-N”表示正负双相暴，“N-P”表示负正双相暴.

高琴等(2008)利用 1959—2006 年磁暴事件得到中低纬地区电离层暴随纬度、季节和地方时的分布特征，同时得到了电离层暴时延特征. 我们跟高琴

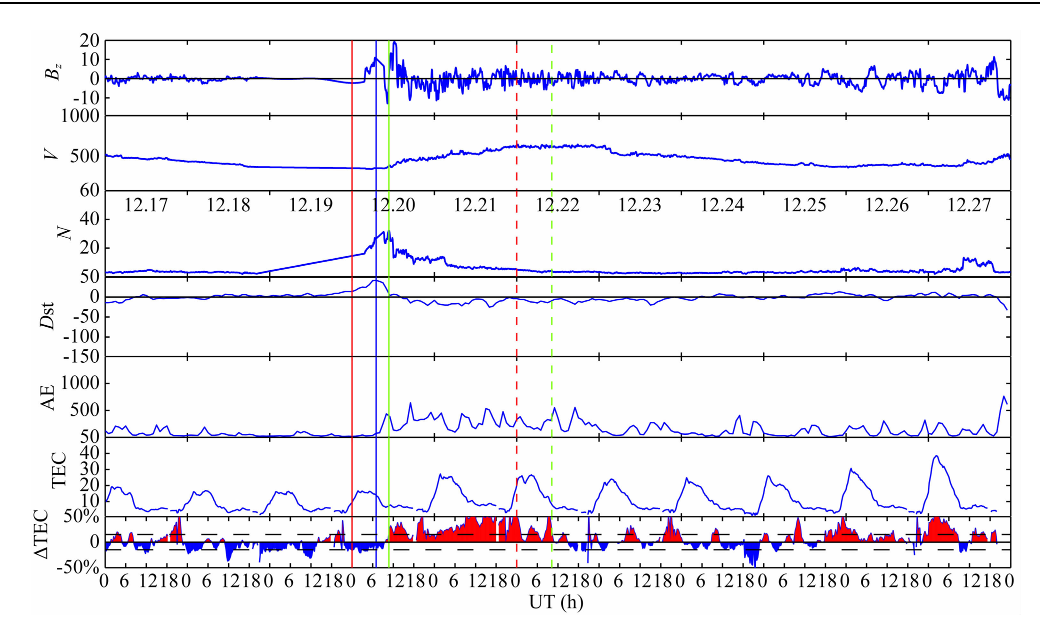


图3 2003年12月19日CIR事件期间正相暴事件

Fig. 3 Example of a CIR-induced positive storm on Dec. 19, 2003

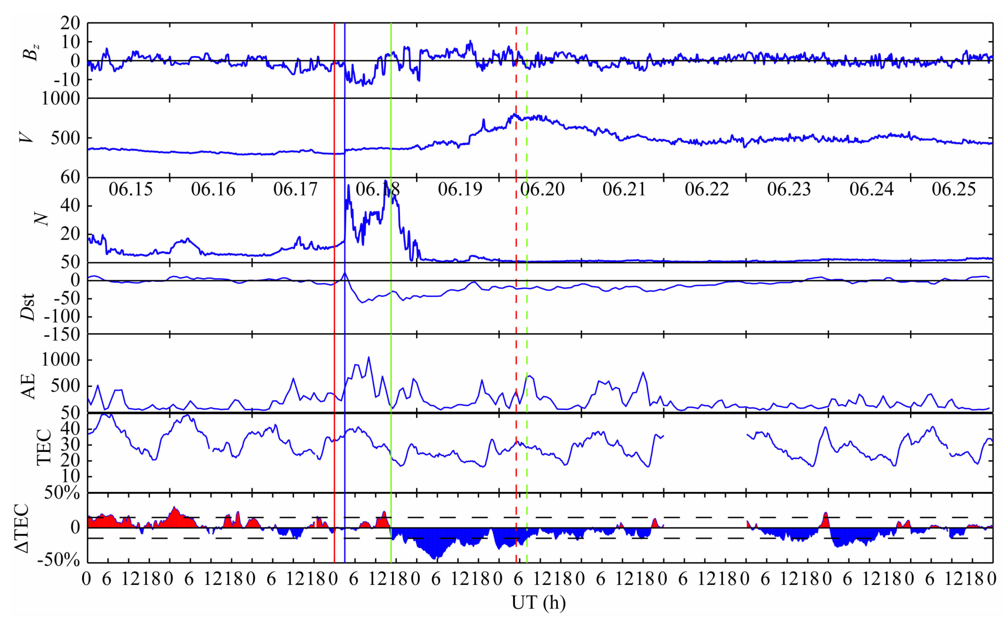


图4 2001年6月18日CIR事件期间负相暴事件

Fig. 4 Example of a CIR-induced negative storm on Jun. 18, 2001

的统计方法和研究方向有一定的相似但也存在着差异.除了与高琴一样分析电离层暴的季节变化和时延变化之外,我们主要研究发生在白天的磁暴事例,侧重对不同行星际条件引发地磁暴期间的电离层暴的统计分析,且进一步研究了电离层暴类型与磁暴强度的关系及电离层的持续时间特征.

3.1 电离层暴类型随年份、季节的分布

CME在太阳活动高年发生频次高,主导了高年的地磁活动,而CIR则主要在太阳活动下降年和低年主导地磁扰动.我们分析了第23太阳活动周电离层不同扰动形态在CME和CIR期间的异同,如图7所示,其中横轴为年份,纵轴为统计的数目.从图中可以看出,中低纬电离层对于白天发生的地磁暴的响应主要表现为正相暴和双相暴.正相暴在太阳活动周发生较均匀,但CIR事件引发的正相暴多发生在下降年,而CME事件引发的正相暴多发生在高年.负相暴均多发生在高年,低年2009年也会发生,在下降年期间几乎不发生,CIR、CME引起的负相暴在年份上差别不是很大.正负双相暴多在下降年发生,基本上都是由CIR源引起的,CME源引起

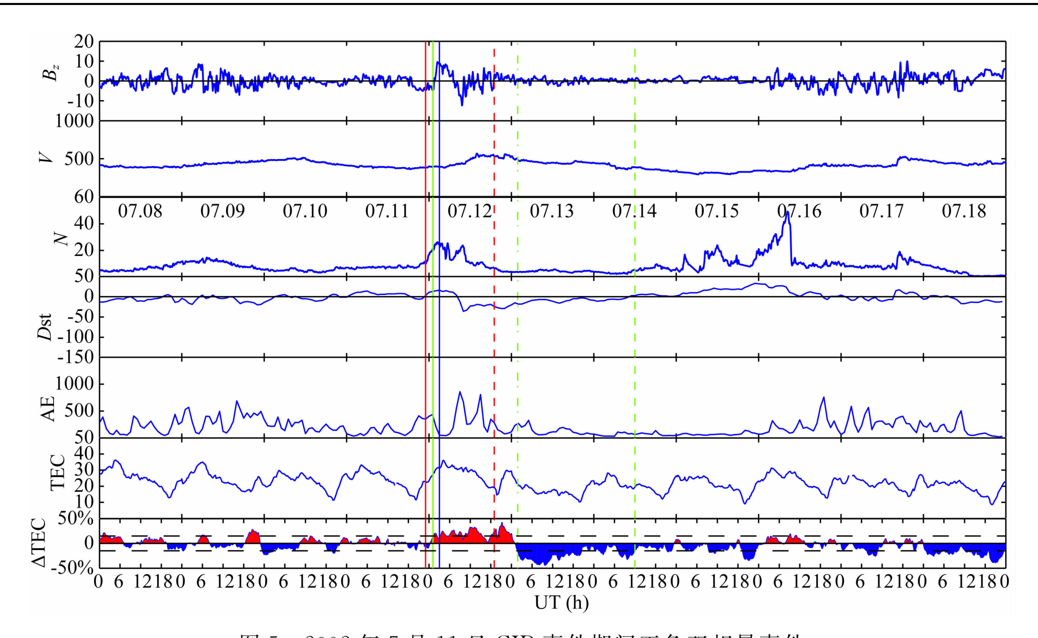


图 5　2002 年 7 月 11 日 CIR 事件期间正负双相暴事件

Fig. 5　Example of a CIR-induced positive-negative biphasic storm on Jul. 11, 2002

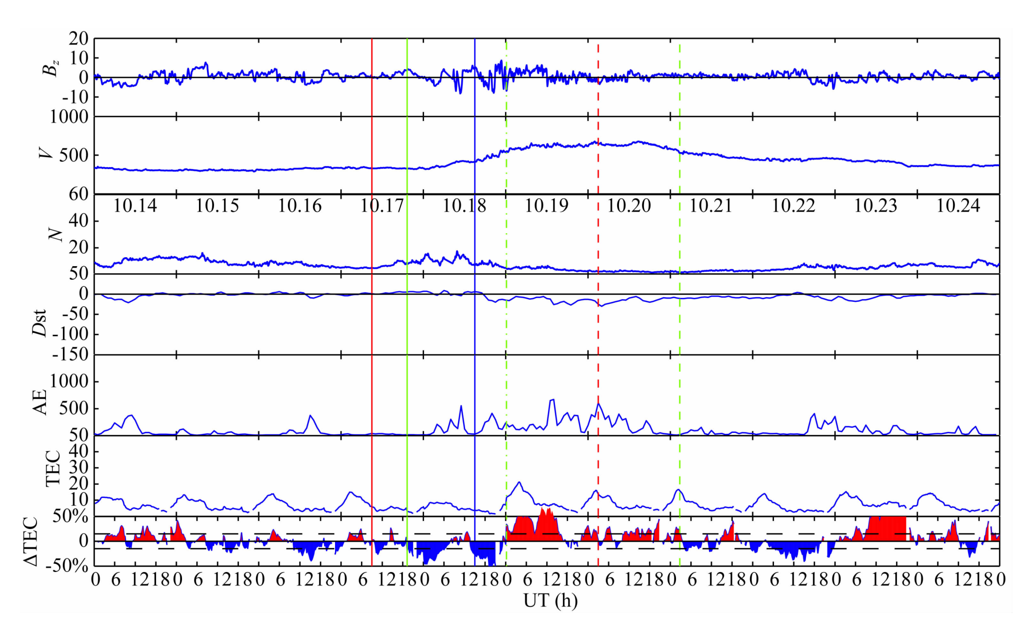


图 6　2007 年 10 月 17 日 CIR 事件期间负正双相暴事件

Fig. 6　Example of a CIR-induced negative-positive biphasic storm on Oct. 17, 2007

的正负双相暴在下降年和低年几乎不发生. 负正双相暴在低年发生，基本上都是由 CIR 源引起的，CME 源引起的负正双相暴在低年几乎不发生.

为了考查电离层暴的季节效应，我们将一年分为春秋季(3、4、9、10 月)、夏季(5、6、7、8 月)、冬季(1、2、11、12 月)进行各类电离层暴的统计分析，如图 8 所示，图中横轴为季节分布，纵轴为统计的数目.

从图中可见，CIR 和 CME 事件期间两者引发的电离层响应没有明显的季节性差异，正相暴、负相暴、负正双相暴在各个季节发生率差别不大，但正负双相暴主要在夏季发生. 以前的统计分析中夏季主要发生负相暴(李春斌，2012；高琴等，2008；Matsushita，1959；Duncan，1969；Basu and Guhathakurta，1975)，而我们的结果有一定的差异，这可能与我们选取的地区为中低纬有关，也可能与电离层发生的地方时有关.

Thomas 和 Venables(1966)、Mendillo(1973)、Balan 和 Rao(1990)等研究了中低纬电离层暴的发生对于地方时的依赖. 他们的研究结果显示，夜间有利于负相暴的发生，而白天有利于正相暴的发生. 我们统计的是起始于白天的地磁活动，在此时间段正相暴易于发生、负相暴受到抑制. 所以，负相暴的统

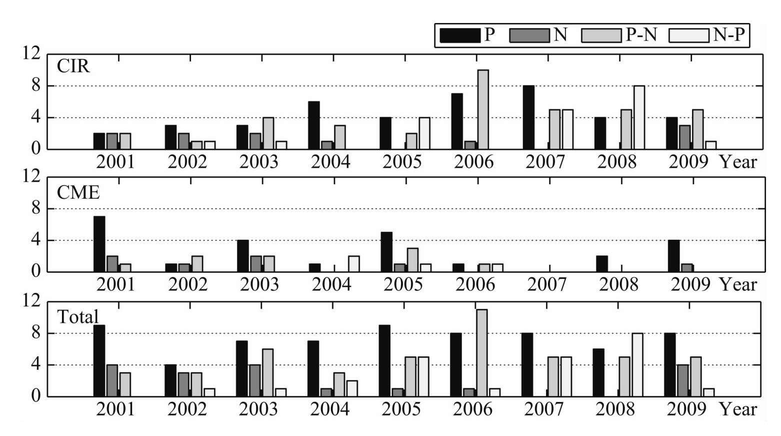


图 7 电离层暴的年份分布

Fig. 7 Year dependence of ionospheric storms

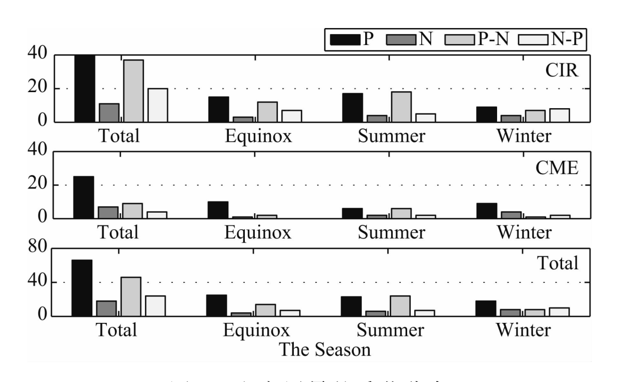


图 8 电离层暴的季节分布

Fig. 8 Seasonal dependence of ionospheric storms

计结果跟以前的统计分析存在着一定的差异.

电离层暴的产生机制目前还没有一致的解释,正相暴的机制比较复杂,与中性风、穿透电场、大气环流、TID 等因素有关(Mendilo,2006).但对于中纬负相暴的机制目前没有太大的争议,主要跟气体中性成分的改变有关.

Duncan(1969)在总结前人的基础上提出了"暴时环流"理论.此后经过不断完善基本上可以用来解释中高纬电离层负暴的季节分布和地方时分布特征.磁暴期间,极光粒子沉降、极光电急流在电离层中产生焦耳热.极光椭圆区热层底部大气受热上升,上升的 N_2 增加.这些含有较多 N_2 分子的气体不断地向外膨胀和扩散.同时被向赤道方向的中性风携带到中纬,F_2 层电子损失系数 β 正比于分子成分的密度,因此在中高纬产生负相电离层暴(赵必强,2006).中性风向赤道方向的传输受到背景风场的方向和强度的作用.不同季节背景风场的不同导致了电离层暴的季节效应.在冬季,极向背景风场强,在中低纬可以观测到很强的电离层正相暴.在夏季,极向背景风场弱,在白天大部分为赤道向背景风场,则夏季白天夜晚都比较容易发生负相暴(Wang et al.,2010;Prölss,1993).从地方时上看,背景风场是白天为极向,夜间为赤道向.白天背景风场与中性风场相互抵制,导致白天电离层负相暴局限于较高的纬度地区.夜间背景风场与中性风场共同作用,使中性风成分传播到较低的纬度,因此在中低纬地区夜间易发生负相暴(Prölss,1993).

3.2 电离层暴的延迟

一般来说,当发生磁暴时电离层并不是马上得到响应,而是经过一段时间才会引起电离层的变化.电离层暴响应源不同,响应时间将有长有短;电离层扰动类型不同,响应时间也会有长有短.根据 2.2 节的介绍,我们将 CIR 和 CME 事件期间连续持续 4 h 以上的电离层扰动刚开始达到 15%的时刻定为电离层暴的起始时间.统计电离层暴开始时间与地磁暴主相开始时间的延迟,结果如图 9 所示,横轴为时延时间,纵轴为统计的数目.从图 9 可以看出,各类电离层暴开始时间与地磁暴的发生时间差主要在 −6~6 h之间.从 CIR 和 CME 的比较来看,CIR 引发的正相暴与 CME 引发的正相暴开始时间与磁暴主相的时延范围在 −6~24 h 之间,但大部分都在 −6~6 h 之内.CIR 引发的负相暴时延主要为 −6~6 h,CME 引发的负相暴延迟时间为 0~12 h. CIR 引发的正负双相暴时延范围为 −12~12 h,而 CME 引发的正负双相暴时延主要在 0~6 h.负正电离层暴主要发生在 CIR 引起的地磁暴之间,一般在 −24~12 h 之间.总的来说,CME 引起的正暴、负暴和正负双相暴发生时间主要在磁暴发生后 0~6 h,而 CIR 引起的电离层暴的开始时间范围更广.

为了更清楚了解电离层不同类型扰动在磁暴各个阶段的出现情况,我们统计了电离层暴开始时间与磁暴不同阶段之间的关系,如图 10 所示,横轴为电离层暴的类型,纵轴为统计的数目,其中初相、主

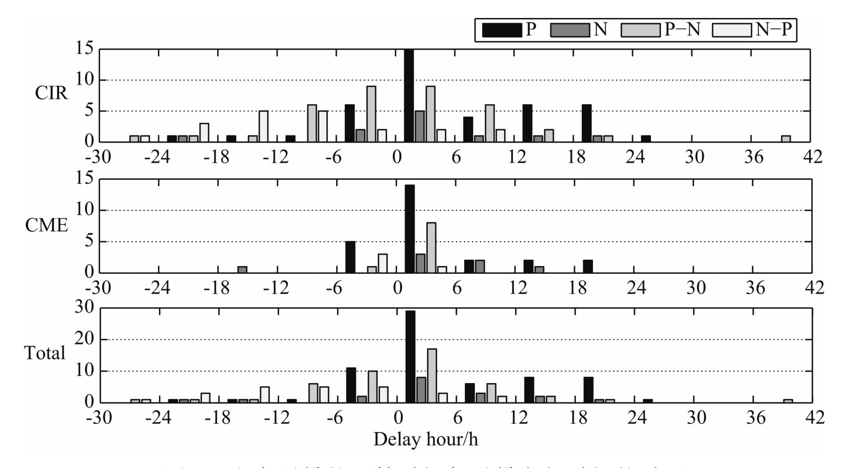


图 9　电离层暴的开始时间与磁暴主相时间的时延

Fig. 9　Time delay between main phase onset and corresponding onset of ionospheric storms

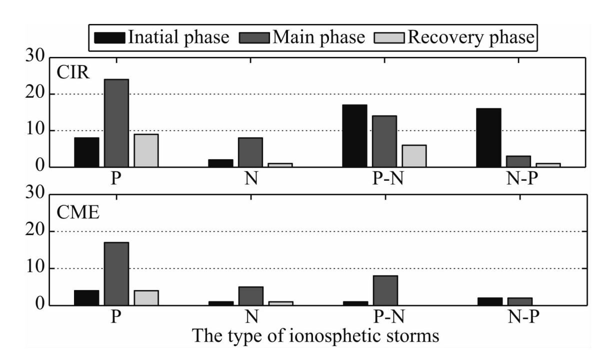


图 10　电离层暴在磁暴不同阶段的类型分布

Fig. 10　Different magnetic storm period dependence of ionospheric storms

相和恢复相是根据 Dst 在不同阶段的形态而定义的(Danilov,2001). 图 10 中可以看出,对于 CIR 引发的电离层暴来说,电离层正相暴、负相暴多发生在磁暴的主相阶段;正负双相暴多发生在磁暴初相、主相阶段;负正双相暴多发生在磁暴初相阶段. 对于 CME 来说,电离层正相暴、负相暴、正负双相暴多发生在磁暴主相阶段.

电离层正暴和正负双相暴开始于磁暴的初相和主相阶段,这可能与磁暴期间行星际扰动引起的穿透电场有关,当行星际磁场南向分量变化时,会引起东向的穿透电场,穿透到中纬地区,将电离层抬升到复合率更小的高度,引起电子密度增加,在磁暴初主相期间的正暴一般认为穿透电场的作用更加明显(Mendilo,2006; Wang et al.,2010; Lei et al.,2008). 另外,小部分正暴和正负双相暴是在磁暴恢复相期间开始发生的,主要体现在 CIR 引起的正暴和正负双相暴中,恢复相期间 CIR 引起的行星际扰动一般能持续 6～7 天(Richardson et al.,2001),这时行星际持续扰动引起的穿透电场也仍然可能是引起电离层正暴的原因. 另外,中性风、热层大气环流引起的成份以及 TID 都可能是引起恢复相期间开始出现正暴的原因(Mendillo,1973).

从图 10 中我们也可以看到,有些电离层暴也会在磁暴初相期间发生,特别是 CIR 引起的负正双相电离层暴,图 9 也表明了负正双相电离层暴一般开始于磁暴主相前,有时甚至在 12 个小时之前,关于暴前的这种电离层扰动还很难解释,一方面可能是由于其他的一些物理过程还不为人们所了解,另一方面也可能与我们的数据分析方法有关,因为我们以 Dst 扰动来作为磁层扰动的标志,但在 Dst 有反应之前,极光椭圆区粒子的加热已经存在,可能会引起全球电离层的扰动.

3.3　电离层暴类型与地磁暴强度之间的关系

我们选取的磁暴发生时间都是在白天,但同一地点电离层扰动的反映并不相同,这与电离层的逐日变化、季节和太阳活动都有一定的关系(如 3.1 节),另外,磁暴的级别也可能是引起电离层反映不同的原因之一. 本文我们对电离层类型与磁暴级别、AE 最大指数的关系做了统计. 图 11 为电离层暴类型与磁暴期间 Dst 最小值、AE 指数最大值之间的关系的统计图.

从图 11(a、c)中电离层暴随 Dst 极值的分布可以看出,大部分的电离层扰动都发生在 Dst 为−50 nT～0 之间,小于−50 nT 的样本很少,很难得到电离层暴类型与 Dst 大小之间的关系. 但从 AE 最大值与电离层暴的类型来看(图 b、d),可以看出电离层负暴和正负相暴多发生在较大的地磁扰动期间,特别是电离层负暴多发生在 AE 极大值为 800～1200 nT 之间. 我们知道,Dst 指数主要表征磁层环电流的大小,而 AE 指数主要表征极区地磁亚暴和极光电集流的大小,与电离层的关系更为密切. 强磁暴期间中

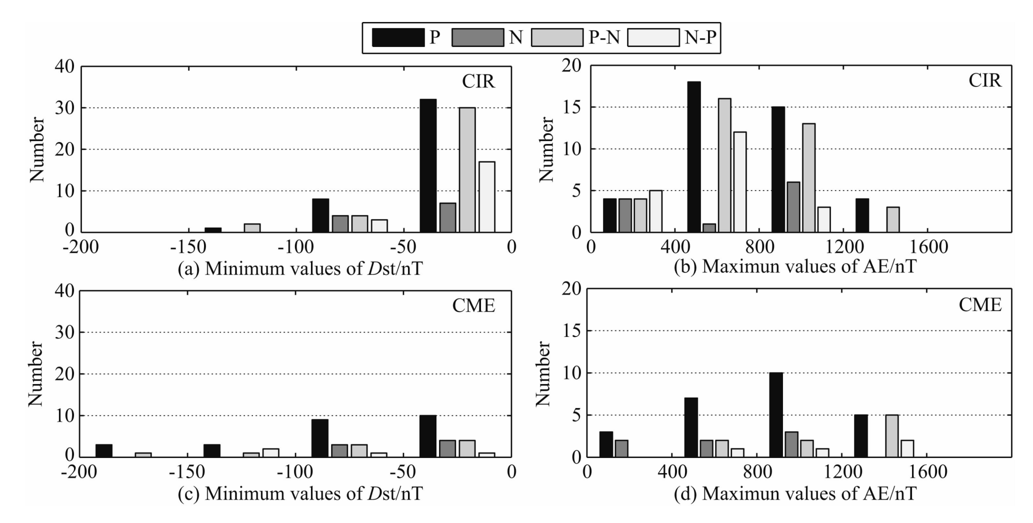


图11 电离层暴类型与地磁暴强度之间的关系

Fig. 11 Geomantic storm intensity dependence of ionospheric storms

纬更容易出现负暴也与热层的化学成份有关,极区焦耳加热能量越高,成份扰动带能扩展到更低的纬度,因此电离层负暴更容易在更低的纬度发生.

3.4 电离层暴的持续时间

电离层暴是有一定持续时间的电离层剧烈扰动现象的事件.在电离层暴期间,地面上短波无线电通信会受到破坏,因此了解电离层暴的持续时间很有必要.目前关于电离层暴持续时间的统计研究并不多.邓忠新等(2012)对1999到2006年间青岛站的电离层正负相暴扰动的持续时间和平均持续时间做了一些统计:正相暴和负相暴的正负相暴持续时间在6～11 h,其平均持续时间分别为10.9、10.5 h. Liu等(2010)指出电离层暴持续时间与季节、纬度和磁暴强度有关,在中高纬地区,电离层负相暴持续时间在9～16 h之间,在中低纬电离层负相暴持续时间短,为5～8 h.正相暴在冬季半球中高纬地区的白天和极区的夜间持续时间较长,而在中低纬地区的夜间持续时间较短.

在本文中,根据第2.2节中定义的电离层暴的开始时间和结束时间,我们将相同类型的电离层暴进行时序叠加,对不同源引发的电离层暴的持续时间进行统计分析.

图12是CIR、CME引发的正相暴的持续时间.横轴是持续时间(单位小时),纵轴是静日扰动的相对偏移量ΔTEC,开始时刻0是所有电离层暴开始的时刻,玫红色粗线为多个电离层正暴叠加得到的ΔTEC中值.由图很清楚地看到,CIR产生的正相暴持续时间大于CME产生的正相暴.CIR正相暴持续时间在1～6天、CME持续时间在1～4天.

图13是2001—2009年CIR、CME负相暴的持续时间,可以看到CIR引发的负相暴事件持续时间一般在1～4天,但有时可以持续到5～6天,CME引发的负相暴持续在1～6天,但事例较少,结果不具有统计意义.

图14是CIR、CME引发的双相电离层暴的持续时间.CIR引发的双相暴(正负双相暴和负正双相暴)持续时间为1～7天,CME引发的双相暴由于统计样本偏低没有很大意义.但从图中还是能看到CIR产生的双相暴持续时间大于CME产生的双相暴持续时间.

图15给出了电离层暴所有类型的持续时间的统计.图中很明显地看出,正负双相暴持续时间最长,一般在2～6天,负相暴和负正电离层暴持续时间居中,一般为1～5天,正相暴持续时间最短,一般为1～4天.CIR引发的电离层暴在正相暴、正负双相暴和负正双相暴持续时间都大于CME引发的电离层暴的.

从上面的结果可以得到,CIR引起的电离层扰动的持续时间比CME的要长,能够达到6天左右,这可能与CIR和CME发生时行星际扰动的形式不同有关,CIR引起的太阳风高速流可持续很长时间,行星际磁场南向分量虽然极值不大(一般在－10 nT左右),但磁场南北向的扰动持续时间很长,因此极区仍然有能量不断注入,引起电离层的扰动.而CME发生时,磁场南向分量一般变化迅速而剧烈,但恢复期也较快,因此引起的电离层扰动时间也相对较短.但在我们分析的事例中,CME引起的电离层暴主要以正相暴为主,其他类型暴的事例都较少,还需要更多的事件进行统计分析.

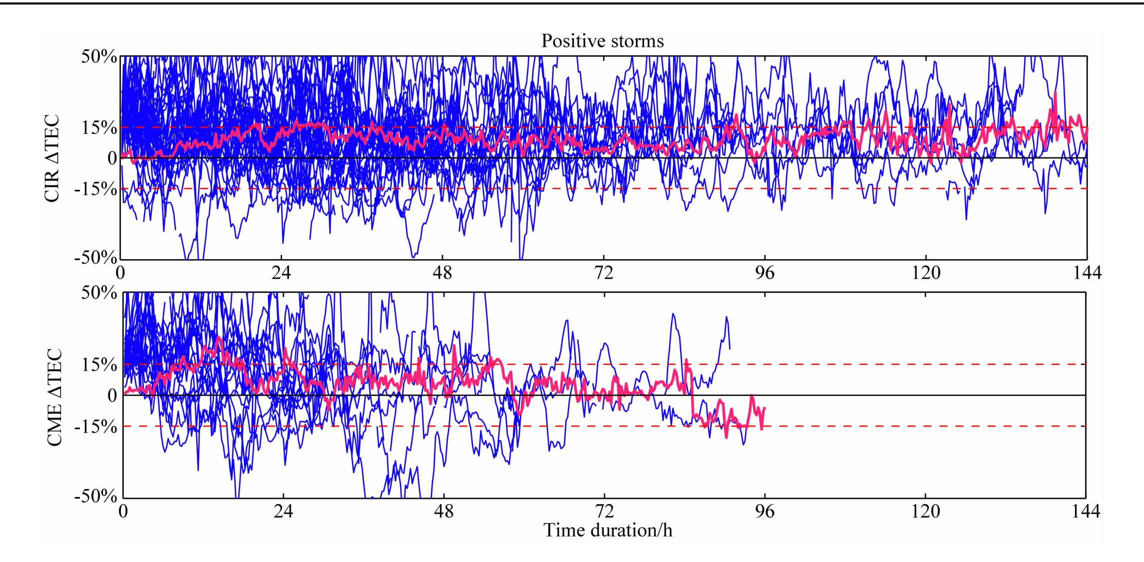


图 12　正相暴的持续时间
Fig. 12　The time duration of positive storms

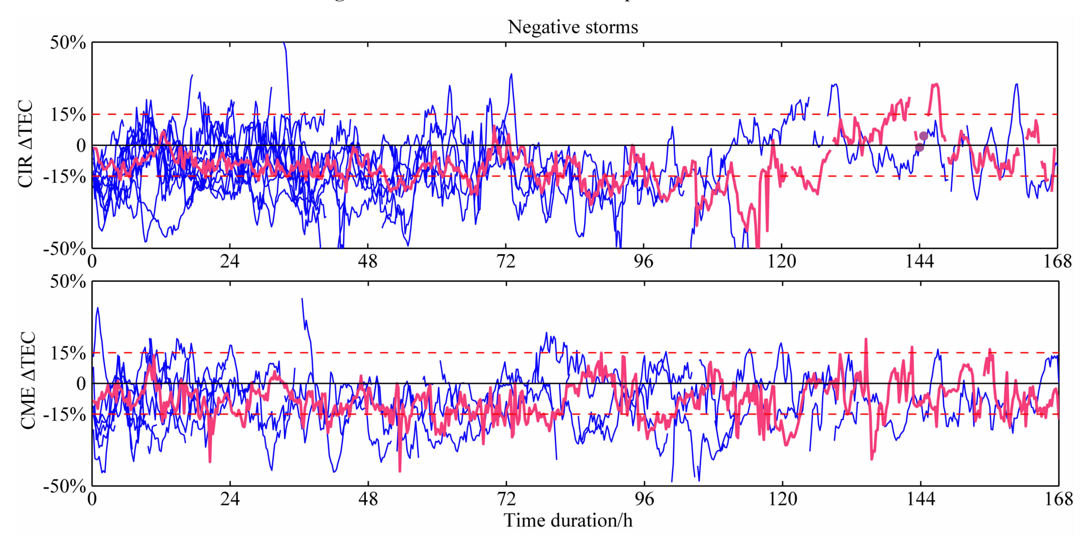


图 13　负相暴的持续时间
Fig. 13　The time duration of negative storms

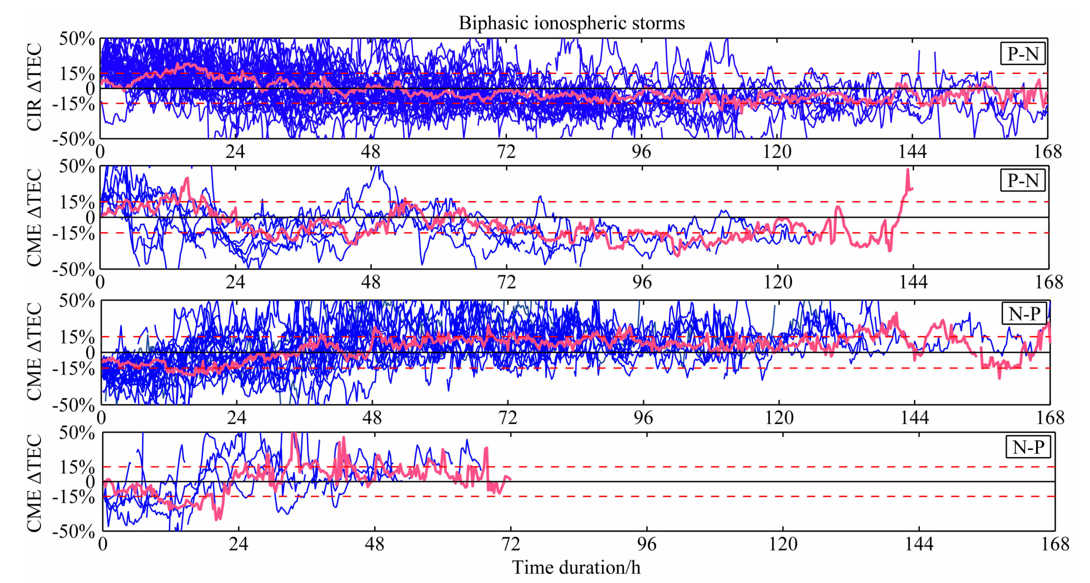


图 14　双相电离层暴的持续时间
Fig. 14　The time duration of biphasic storms

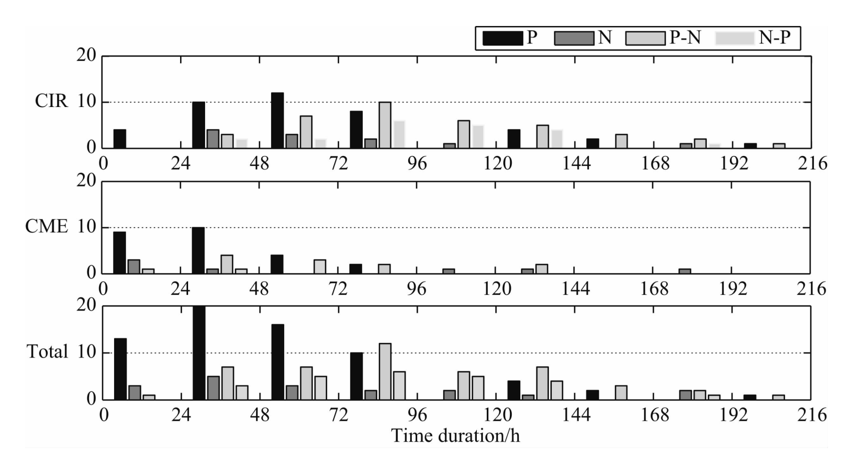


图15 电离层暴的持续时间

Fig.15 The time duration of ionospheric storms

4 结论

本文基于中低纬地区日本格点(135°E, 35°N)的GPS-TEC数据,分析了2001—2009年电离层TEC对CIR和CME的响应.结果表明:

(1)电离层暴分布存在着年份和季节性差异.电离层正暴在高低年出现概率差别不大,但高年主要由CME引起,低年主要由CIR引起.电离层负暴多发生在太阳活动高年.正负双相暴多发生在太阳活动下降年,负正双相暴多发生在低年,主要由CIR引起.季节分布上,夏季多发生正负双相暴,其他类型电离层暴出现概率的季节性差异不大.

(2)电离层暴对地磁暴的响应存在着一定的时延,主要分布在−6～6 h之间.CIR引起的电离层暴时延比CME引起的电离层暴时延范围更广.CIR引发的正相暴、负相暴多发生在磁暴的主相阶段;正负双相暴多发生在磁暴初相、主相阶段;负正双相暴多发生在磁暴初相阶段.CME引发的正相暴、负相暴、正负双相暴多发生在磁暴主相阶段.

(3)电离层暴的类型与地磁AE指数最大值间存在着一定的关系.电离层负相暴多发生在较强级别的地磁暴(AE最大值为800～1200 nT)之间.

(4)对电离层扰动持续时间的分析表明,CIR引起的电离层扰动持续时间(1～6天)比CME的(1～4天)要长.这可能是CIR和CME在行星际扰动的形式不同而造成的.

关于电离层对行星际条件的响应有助于研究电离层的扰动.本文对2001—2009年间的电离层对CIR和CME响应的区别进行的相关分析进一步阐明了电离层变化与太阳活动、行星际条件、地磁条件之间的存在一定的关系,也为下一步更加细致地分析不同源下电离层暴的具体的形态打下基础.

致谢 文中所采用的GPS-TEC、*D*st和AE数据来自于世界数据中心日本电离层数据网站http://wdc.nict.go.jp/IONO/gps-tec/tecv/和地磁数据网站http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp.太阳风数据来自于http://omniweb.gsfc.nasa.gov.作者在此谨表感谢.

References

Adeniyi J O. 1986. Magnetic storm effects on the morphology of the equatorial F2-layer. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 48(8): 695-702.

Akasofu S I, Chapman S. 1961. The ring current, geomagnetic disturbance and the van Allen radiation belts. *J. Geophys. Res.*, 66(5): 1321-1350.

Appleton E V, Piggott W R, et al. 1952. The morphology of storms in the F_2 layer of the ionosphere I. Some statistical relationships. *J. Atmospheric Terrest. Phys.*, 2(4): 236-252.

Balan N, Rao P B. 1990. Dependence of ionospheric response on the local time of sudden commencement and the intensity of geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 52(4): 269-275.

Basu S, Guhathakurta B K. 1975. Ionospheric response to geomagnetic storms at low midlatitudes. *Ann. Geophys.*, 31(4): 497-505.

Belehaki A, Moraitis G, Tsagouri I. 2000. On the derivation of an hourly local index to define the normal ionosphere. *Annals of Geophysics*, 43(1): 189-204.

Boroysky J E, Denton M H. 2010. Magnetic field at geosynchronous orbit during high-speed stream-driven storms: Connections to the solar wind, the plasma sheet, and the outer electron radiation belt. *J. Geophys. Res.*, 115(A8): 8217, doi: 10.1029/2009JA015116.

Burns A G, Solomon S C, Qian L Y, et al. 2012. The effects of corotating interaction region/High speed stream storms on the thermosphere and ionosphere during the last solar minimum. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 83: 79-87.

Crooker N U, Cliver E W. 1994. Postmodern view of M-regions. *J. Geophys. Res.*, 99(A12): 23383-23390.

Danilov A D. 2001. F2-region response to geomagnetic disturbances. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 63(5): 441-449.

Deng Z X, Liu R Y, Zhen W M, et al. 2012. Study on the ionospheric TEC storms over China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(7): 2177-2184, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.004.

Duncan R A. 1969. F-region seasonal and magnetic-storm behavior. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 31(2): 59-70.

Gao Q, Liu L B, Zhao B Q, et al. 2008. Statistical study of the storm effects in middle and low latitude ionosphere in the East-Asian sector. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(3): 626-634.

Jian L, Russell C T, Luhmann J G, et al. 2006a. Properties of interplanetary coronal mass ejections at one AU during 1995—2004. *Solar Physics*, 239(1-2): 393-436.

Jian L, Russell C T, Luhmann J G, et al. 2006b. Properties of stream interactions at one AU during 1995—2004. *Solar Physics*, 239(1-2): 337-392.

Kouris S S, Polimeris K V, Cander L R. 2006. Specifications of TEC variability. *Adv. Space Res.*, 37(5): 983-1004.

Kouris S S. 2008. Thresholds of TEC variability describing the plasmaspheric disturbed state. *Acta Geophysica.*, 56(2):408-412.

Lei J H, Wang E B, Burns A G, et al. 2008. Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: Initial phase. *J. Geophys. Res.*, 1139(A1): 1978-2012, doi: 10.1029/2007JA012807.

Liu J, Zhao B, Liu L. 2010. Time delay and duration of ionospheric total electron content response to geomagnetic disturbances. *Annales of Geophysicae.*, 28(3): 795-805.

Ma G, Maruyama T. 2003. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. *Aannales Geophysicae.*, 21(10): 2083-2093.

Martyn D F. 1953. The morphology of the ionospheric variations associated with magnetic disturbance. I. variations at moderately low latitude. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 218(1132): 1-18.

Matsushita S. 1959. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.*, 64(3): 305-321.

Mendillo M. 1973. A study of the relationship between geomagnetic storms and ionospheric disturbances at mid-latitudes. *Planetary and Space Science*, 21(3): 349-358.

Mendilo M. 2006. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content. *Reviews of Geophysics*, 44(4), doi: 10.1029/2005RG000193.

Mursula K, Zieger B. 1996. The 13.5-day periodicity in the sun, solar wind, and geomagnetic activity: The last three solar cycles. *J. Geophys. Res.*, 101(A12), 27077-27090.

Ogilvie K W, Burlaga L F, Wilkerson T D. 1968. Plasma observations on Explorer 34. *J. Geophys. Res.*, 73(21): 6809-6824.

Prölss G W, Brace L H, Mayr H G, et al. 1991. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: a case study. *Journal of Geophysical Research*, 96(2): 1275-1288.

Prölss G W. 1993. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. *Ann. Geophys.*, 11(1): 1-9.

Richardson I G, Cliver E W, Cane H V. 2001. Sources of geomagnetic storms for solar minmum and maximum conditions during 1972—2000. *J. Geophys. Res.*, 28(13): 2569-2572.

Siscoe G L, Formisano V, Lazarus A J. 1968. Relation between geomagnetic sudden impulses and solar wind pressure changes—an experimental investigation. *J. Geophys. Res.*, 73(15): 4869-4874.

Thomas L, Venables F H. 1966. The onset of the F-region disturbance at middle latitudes during magnetic storms. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 28(6-7): 599-605.

Tsurutani B T, Gonzalez W D, Gonzalez A L C, et al. 1995. Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle. *J. Geophys. Res.*, 100(A11): 21717-21733.

Tsurutani B T, Gonzalez W D, Gonzalez A L C, et al. 2006. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *J. Geophys. Res.*, 111: A07S01, doi: 10.1029/2005JA011273.

Wang W B, Lei J H, Burns A G, et al. 2010. Ionospheric response to the initial phase of geomagnetic storms: Common features. *J. Geophys. Res.*, 115(A7), doi: 10.1029/2009JA014461.

Webb D F. 1991. The solar cycle variation of the rates of CMEs and related activity. *Advances in Space Research*, 11(1): 37-40.

Wrenn G L, Rodger A S, Rishbeth H. 1987. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. I. Diurnal and seasonal patterns for main phase effects. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 49(9): 901-913.

Xu J S, Zhu J, Cheng G H. 2006. GPS observations of ionospheric effects of the major storm of Nov. 7-10, 2004. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 49(4): 950-956.

Yashiro S, Gopalswamy N, Michalek G, et al. 2004. A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft. *J. Geophys. Res.*, 109(A7): A07105, doi: 10.1029/2003JA010282.

Zhan L, Liu L B, Wan W X, et al. 2007. Morphology of ionospheric disturbances over Kokubunji during geomagnetic disturbances. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 27(5): 391-399.

Zhang Q W, Guo J S, Zhang G L, et al. 1995. Mid-and Low-latitude ionospheric responses to different type of magnetic storm. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 38(5): 581-589.

Zhao B, Wan W, Lei J, et al. 2012. Positive ionospheric storm effects at Latin America longitude during the superstorm of 20-

22 November 2003: revisit. *Annales Geophysicae*., 30(5): 831-840.

Zhao B Q, Wang M, Wang Y G, et al. 2013. East-west differences in F-region electron density at midlatitude: Evidence from the Far East region. *J. Geophys. Res.*, 118(1): 542-553.

附中文参考文献

邓忠新，刘瑞源，甄卫民等. 2012. 中国地区电离层 TEC 暴扰动研究. 地球物理学报，55(7): 2177-2184, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.004.

高琴，刘立波，赵必强等. 2008. 东亚扇区中低纬地区电离层暴的统计分析. 地球物理学报，51(3): 626-634.

李春斌. 2012. 中低纬电离层异常扰动统计分析[硕士论文]. 西安：西安电子科技大学.

李利斌，吴振华，王炳康. 1996. 武昌地区急始型磁暴期间电离层电子浓度总含量的变化. 空间科学学报，16(2): 133-139.

徐继生，朱劼，程光晖. 2006. 2004年11月强磁暴期间武汉电离层 TEC 的响应和振幅闪烁特征的 GPS 观测. 地球物理学报，49(4): 950-956.

占亮，刘立波，万卫星等. 2007. 地磁扰动期间日本 Kokubunji 站电离层的扰动特征分析. 空间科学学报，27(5): 391-399.

张奇伟，郭兼善，章公亮等. 1995. 不同类型磁暴和中低纬电离层暴的关系. 地球物理学报，38(5): 581-589.

赵必强. 2006. 中低纬电离层年度异常与暴时特性研究[博士论文]. 武汉：中国科学院武汉物理与数学研究所.

（本文编辑　胡素芳）